

超高速無線通信を支える高耐熱・低誘電損失ポリマー材料

○安藤 慎治・澤田梨々花・劉 浩男（東京科学大・物質理工）

第5～6世代（5G～6G）の無線通信技術の急速な発展に伴い、その動作周波数域は従来のサブ GHz 帯から数十 GHz、さらに数百 GHz のミリ波～サブ THz 帯へと拡大しつつある。このような高周波域において、低誘電率（ D_k ）および低誘電損失率（ D_f ）を示す絶縁材料を実現することは、高速パッケージ基板、アンテナ誘電体層、高周波デバイスにとって極めて重要であるが、計測機器が希少なこともあり低誘電材料の設計指針は確立されていない。現在、熱可塑性液晶ポリマー（LCP）が、低い吸水率と優れた誘電特性により量産されているが、耐熱性、化学的安定性、電気絶縁性、機械的強度、薄膜加工性などからポリイミド（PI）に代表されるスーパーエンプラが次世代低誘電材料として期待される。但し、Kapton に代表される従来の芳香族 PI は大きな分極率と高い吸湿性に起因して D_k が高く、 D_f の湿度依存性も大きいため応用が制限される。

われわれは 15 種の PI 群の 10 GHz における誘電挙動を、電子分極と双極子分極の 2 つの機構に分離して体系的に整理し（図 1）¹⁾、 D_k が単位体積あたりの電子分極率と極性基比率（Polar%）に、また D_f が PI 面内の双極子分極（ $P_{d(TE)}$ ）と高い相関にあることを明らかにした（図 2）。さらに自作装置により誘電特性の相対湿度（RH）依存性を計測したところ²⁾、すべての PI 群で RH の上昇に伴い D_k 、 D_f が直線的に増加し、かつ両者の傾き（ h_{Dk} 、 h_{Df} ）の間に高い相関が認められた（図 3）。ここで、I) 類の高フッ素化 PI と市販の半結晶性 PI は、F 基の疎水性と高度な秩序構造により水の侵入が阻害されるが、III) 類の Kapton や植物由来 PI³⁾ は、大きな分極と自由体積分率により RH 依存性が大きい。この機構を解明するため、PI 分子鎖に吸着した水分量とその水素結合構造を湿度可変 FT-IR によって解析し、PI 分子鎖に二次的に結合する“自己会合水”が D_f の上昇に大きく寄与することを明らかにした。さらに EM ラボ(株)の協力により 25～330 GHz における D_k 、 D_f の周波数依存性を計測し、PFAS 規制にかからない全フッ素化・高フッ素化 PI 群が極めて小さな湿度依存性と周波数依存性を示すことを報告した^{4,5)}。

1) Sawada R, Ando S. *J. Phys. Chem. C*, 2024, **128**, 6979-6990. 2) Sawada R, Liu, H, Ando S. *J. Phys. Chem. B*, 2025, **129**, 10928-10943. 3) Sawada R, Ando S. *Macromolecules*, 2022, **55**, 6787-6800. 4) Liu H, Sawada R, Yanagimoto Y&S, S. Ando *App. Phys. Lett.*, 2024, **124**, 232903. 5) Sawada R, Liu H, Yanagimoto Y&S, Ando S *ACS Appl. Polym. Mater.*, 2025, **7**, 14371-14381.

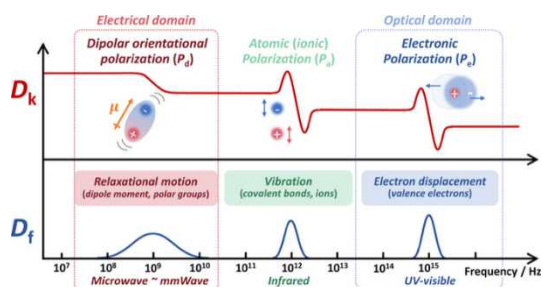


Fig. 1 Origin and frequency dependence of D_k and D_f . (the electronic and dipolar terms are dominant).

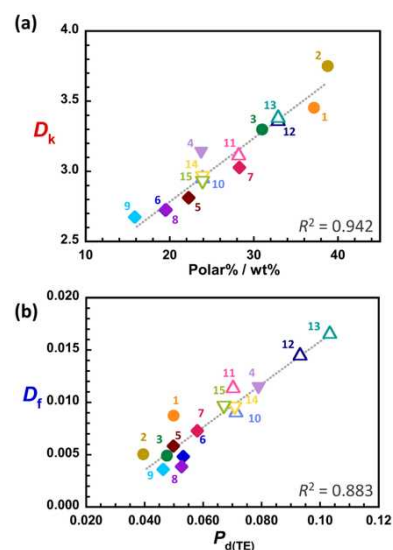


Fig. 2 Relations between a) D_k vs wt fraction of polar groups (Polar%), and b) D_f vs. in-plane dipolar polarizability ($P_{d(TE)}$) at 10 GHz.

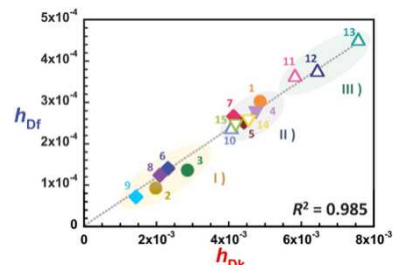


Fig. 3 Relations between the RH dependence (slopes) of D_k and D_f for 13 types of PIs at 10 GHz.

PROFILE

安藤 慎治（東京科学大学 名誉教授・同物質理工学院 研究員）

1989 年 東京工業大学高分子工学専攻 博士課程修了（工学博士）、1989 年 日本電信電話(株)境界領域研究所研究員、1995 年 東京工業大学高分子工学専攻 助教授、1998-99 年 英国 Durham 大学化学科客員研究員、2006 年 東京工業大学物質科学専攻 教授、2024 年 東京科学大学 物質理工学院 教授。2026 年 同 定年退職。専門分野：耐熱性高分子の構造解析と光・熱・誘電物性の高機能化、DFT 計算による高分子の物性予測。趣味：欧風料理、南ヨーロッパの巡礼路歩き、宗教美術。